



## BULLETIN POUR LE

# Réseau canadien de recherches antarctiques

## Intérieur

Expédition universitaire  
antarctique de l'API :  
février 2009

1

L'Aridité aujourd'hui et  
les inondations d'hier

2

Sander Geophysics  
explore l'Antarctique

17

Nouvelles en bref

19

## Expédition universitaire antarctique de l'API : février 2009

Luke Copland

Au début de 2009, Students on Ice (soi) mènera la toute première expédition universitaire à bord d'un navire consacrée à l'Antarctique. Cette expédition donnera aux étudiants une occasion incroyable d'obtenir des crédits pour des cours suivis à l'un des endroits les plus éloignés et les plus exceptionnels de la Terre. L'expédition officiellement parrainée par l'Année polaire internationale (API) est l'une de ses plus grandes initiatives d'éducation et sensibilisation. Elle regroupera environ 70 étudiants ainsi que 19 enseignants, scientifiques, experts et éducateurs. La plupart des étudiants n'ont pas encore obtenu leur premier diplôme d'une université canadienne, mais plusieurs étudiants des cycles supérieurs et d'autres pays seront aussi membres de l'expédition. Le thème est «le leadership environnemental», et le programme prévoit l'étude de l'histoire, de la science et des aspects politiques de l'Antarctique. L'un des principaux objectifs est de donner aux étudiants la possibilité de combler l'écart entre la théorie et la pratique grâce à l'apprentissage expérientiel et aux expériences menées sur le terrain, et de constater eux-mêmes les effets du changement de climat.

Tous les étudiants devront participer à l'un des trois cours accrédités qui



seront offerts à bord. *Étude pratique des sciences de la terre et de l'atmosphère* (EAS429), un cours de l'Université de l'Alberta, sera donné par la M<sup>me</sup> Marianne Douglas, directrice de l'Institut circumpolaire canadien. Il traitera de sujets comme le système du Traité sur l'Antarctique, l'évolution de la circulation dans l'océan Austral, le climat antarctique et l'évolution tectonique du continent antarctique, et comprendra des notions d'océanographie de base. *Glaciologie* (GEG4100), un cours de l'Université d'Ottawa, sera donné par M. Luke Copland. Il couvrira tous les sujets liés à la cryosphère antarctique, notamment la glace marine, les plates-formes de glace, les courants glaciaires et l'inlandsis antarctique. *Tourisme antarctique* (ORTM433), un cours de l'Université du Nord de la Colombie-Britannique donné par M. Pat Maher, fera un examen approfondi des répercussions environnementales, sociales et économiques du tourisme antarctique. En outre, des enseignants d'autres universités participeront à l'expédition afin d'aider à établir une stratégie à long terme ainsi qu'un programme de futures expéditions universitaires qui seront menées en Arctique et en Antarctique.

Les membres de l'expédition quitteront le Canada le 12 février 2009. Ils passeront quelques jours à Ushuaia et dans le parc national de la Terre de feu, en Argentine, où ils suivront des séances d'orientation, avant de s'embarquer sur le M/V *Ushuaia* le 16 février. Ce navire à coque renforcée a été nolisé exclusivement pour l'expédition. Ses installations comprennent des salles de cours spécialement adaptées et des locaux qui serviront de

laboratoires aux enseignants. Les étudiants passeront 10 jours à bord du M/V *Ushuaia* alors que celui-ci ira de l'Amérique du Sud jusqu'aux îles Shetland du Sud et atteindra finalement la péninsule antarctique. Une fois rendus en Antarctique, ils débarqueront plusieurs fois par jour sur les côtes, transportés par des zodiacs à des endroits comme l'île Éléphant, Whaler's Bay et Neko Harbour. Des escales sont également prévues à la station Esperanza de l'Argentine et à la station Vernadsky de l'Uruguay. Les visites sur le littoral apporteront une expérience pratique propre aux éléments du milieu antarctique comme les plates-formes de glace, les glaciers, les manchots et les phoques, et complèteront les exposés magistraux à bord. Les intéressés peuvent trouver plus de détails sur le programme et l'expédition sur le site [www.uantarctic.org/](http://www.uantarctic.org/).

SOI organise depuis 2000 des expéditions par bateau en Arctique et en Antarctique pour les étudiants du secondaire, mais celle-ci est le premier voyage universitaire. L'organisme SOI a été fondé par Geoff Green, qui a entrepris plus de 100 expéditions dans les régions polaires et s'est vu décerner de nombreux prix de leadership environnemental et pour ses réalisations éducatives. Les personnes désireuses de participer à de futures expéditions devraient communiquer avec l'organisme par l'entremise du site [www.studentsonice.com](http://www.studentsonice.com).

Luke Copland ([luke.copland@uottawa.ca](mailto:luke.copland@uottawa.ca)).

## L'Aridité aujourd'hui et les inondations d'hier

John Shaw

### Vallée sèche Wright

Les chutes de neige atteignent moins de 50 mm EEN sur la plus grande partie de l'Antarctique, le continent le plus froid et le plus sec, et les mesures prises par les scientifiques de la Nouvelle-Zélande laissent supposer que certains glaciers alpins des vallées sèches de McMurdo reçoivent à peine 8 mm EEN. La fonte est minime sur les nappes glaciaires antarctiques; la subli-

mation supprime une grande partie de la glace, et le vent souffle la neige vers l'océan Austral – les glaciers émissaires et les courants glaciaires rapides vèlent des icebergs dans l'océan. Par conséquent, une très faible quantité d'eau liquide alimente les maigres rivières. La plus longue rivière de l'Antarctique, l'Onyx, coule à l'intérieur du continent, le long de la vallée Wright, l'une des vallées sèches de McMurdo (fig. 1), à partir du glacier

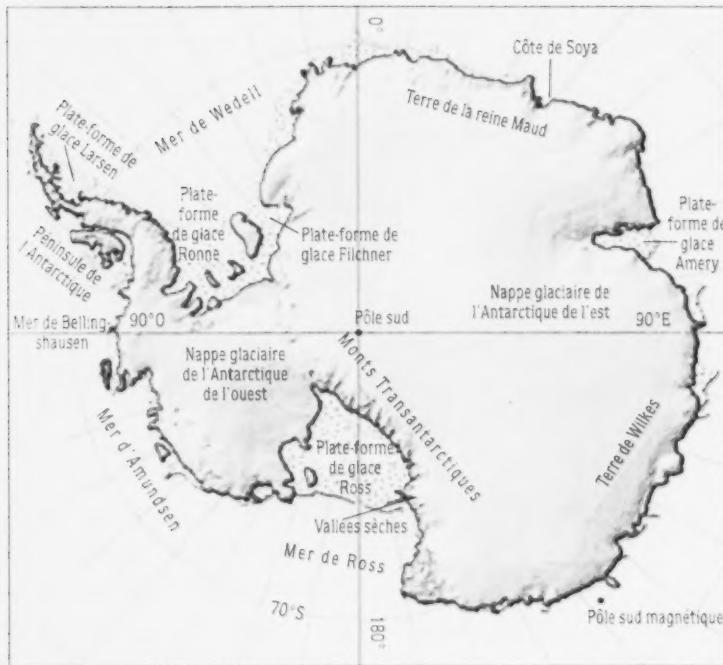
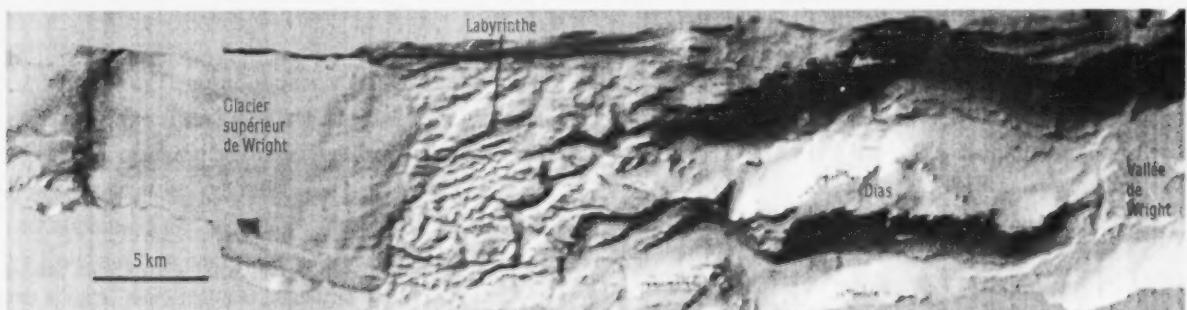


Figure 1  
Carte de localisation. Cartographie Hugo Ahlenius UNEP-GRID-Arendal.

Figure 2  
Carte à relief ombré du labyrinthe, vallée sèche Wright, dressée à partir d'un modèle d'élévation numérique. Mission d'exécution de levés des vallées sèches de la NASA. Post-traitement par les universités Brown et de l'État de l'Ohio. Gracieuseté d'Adam Lewis.



inférieur Wright jusqu'au lac Vanda, couvrant ainsi une distance d'environ 40 km. La rivière Onyx atteint une largeur d'environ 10 m et sa profondeur maximale est de 0,5 m. L'eau coule à partir du début de décembre jusqu'à la fin de février, et le débit annuel maximum est d'environ  $1 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ .

Cette extrême aridité domine le paysage depuis peut-être des millions d'années, même si à certaines périodes la vallée Wright a subi des inondations majeures. L'écoulement des eaux a alors atteint des proportions égales au débit de toutes les rivières du monde. La preuve de ces inondations se trouve dans le paysage sillonné de chenaux dans la partie ouest de la vallée, qui pourrait avoir été importé de la planète Mars. Un réseau complexe de chenaux qui n'ont rien à voir avec les conditions actuelles constitue ce qu'on appelle communément le labyrinthe. Ce nom pourrait être trompeur parce que les actuels chenaux ne suivent pas le modèle de labyrinthe de la Crète que l'on trouve à Knossos, mais les labyrinthes de l'Antarctique et de la Grèce entrent dans le domaine des mythes.

## Le labyrinthe

### Paysage

Le plancher de la vallée Wright s'élève abruptement de manière à former un éminent gradin à l'ouest de la rivière Onyx et du lac Vanda, dans les vallées sèches (fig. 1). Le paysage change d'une façon spectaculaire au gradin; la vallée aux flancs lisses se transforme en bloc accidenté taillé dans la roche ignée dure (fig. 2).

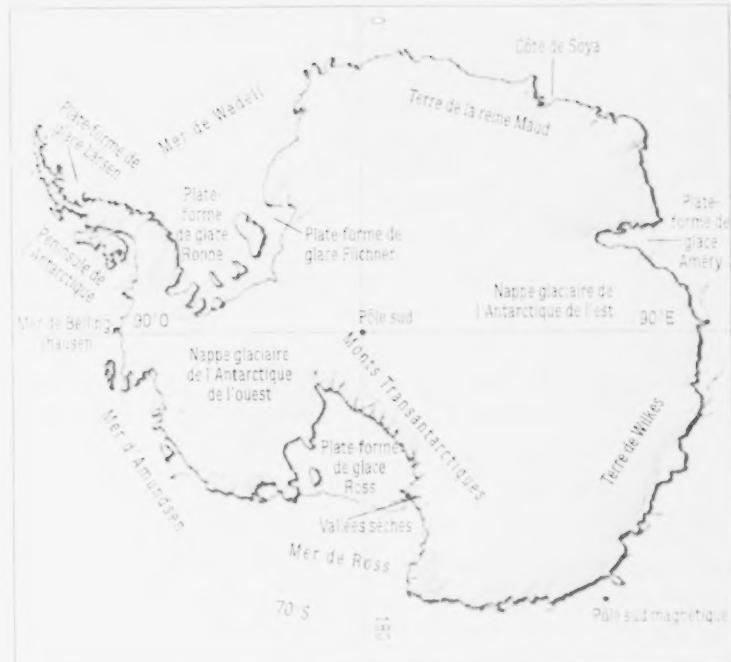
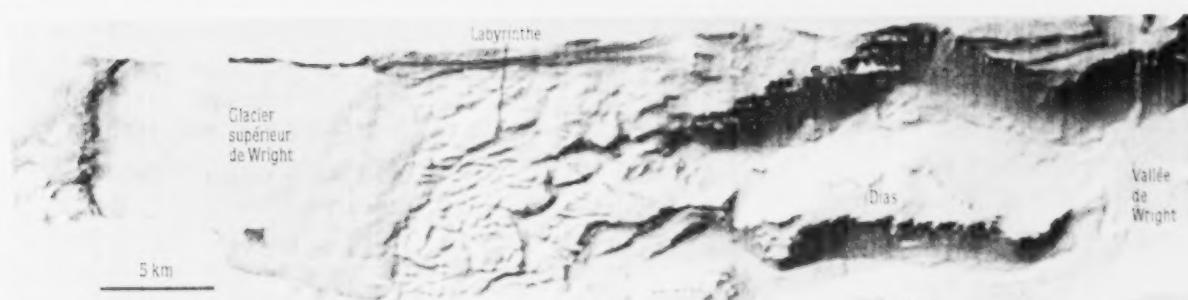


Figure 1  
Carte de localisation. Cartographie Hugo Ahlenius UNEP-GRID-Arendal.

Figure 2  
Carte à relief ombre du labyrinthe, vallée seche Wright, dressée à partir d'un modèle d'élevation numérique, Mission d'exécution de levés des vallées sèches de la NASA. Post-traitement par les universités Brown et de l'Etat de l'Ohio. Gracieuseté d'Adam Lewis.



inférieur Wright jusqu'au lac Vanda, couvrant ainsi une distance d'environ 40 km. La rivière Onyx atteint une largeur d'environ 10 m et sa profondeur maximale est de 0,5 m. L'eau coule à partir du début de décembre jusqu'à la fin de février, et le débit annuel maximum est d'environ  $1 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$ .

Cette extrême aridité domine le paysage depuis peut-être des millions d'années, même si à certaines périodes la vallée Wright a subi des inondations majeures. L'écoulement des eaux a alors atteint des proportions égales au débit de toutes les rivières du monde. La preuve de ces inondations se trouve dans le paysage sillonné de chenaux dans la partie ouest de la vallée, qui pourrait avoir été importé de la planète Mars. Un réseau complexe de chenaux qui n'ont rien à voir avec les conditions actuelles constitue ce qu'on appelle communément le labyrinthe. Ce nom pourrait être trompeur parce que les actuels chenaux ne suivent pas le modèle de labyrinthe de la Crète que l'on trouve à Knossos, mais les labyrinthes de l'Antarctique et de la Grèce entrent dans le domaine des mythes.

## Le labyrinthe

### Paysage

Le plancher de la vallée Wright s'élève abruptement de manière à former un éminent gradin à l'ouest de la rivière Onyx et du lac Vanda, dans les vallées sèches (fig. 1). Le paysage change d'une façon spectaculaire au gradin; la vallée aux flancs lisses se transforme en bloc accidenté taillé dans la roche ignée dure (fig. 2).

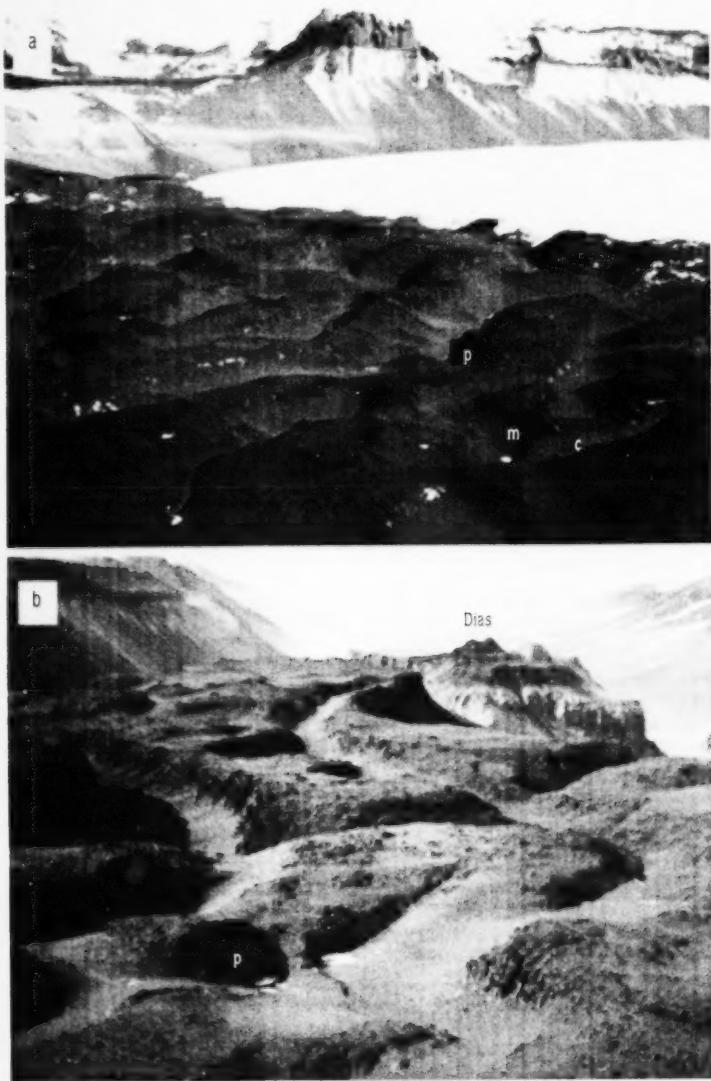


Figure 3

Le labyrinthe : a) à l'ouest, vers le glacier supérieur Wright et les monts transantarctiques (m = marmite, c = chenal, p = muschle-bruche [marque d'érosion ou s-form avec bordures nettement définies en amont]), à noter les chenaux discontinus; b) à l'est, vers les Dias et la vallée Wright, les chenaux sont plus profonds que dans a). Les falaises presque verticales sont des exemples de dolérite jointe et de l'effondrement de blocs reliés. Les hauts éboulis reflètent l'antiquité.

Des chenaux à la fois larges et profonds, bordés de falaises escarpées, dissèquent le plancher d'une vallée ancienne. C'est comme si cent Grand Canyons miniatures étaient simultanément érodés (fig. 3a et b). Des blocs de roche fracturés disposés selon un équilibre précaire sur des falaises fracturées basculent et tombent sur les éboulis qui se sont formés plus bas. L'altération mécanique plus efficace sur les falaises donnant sur le nord indique une plus grande fréquence de cycles de gel-dégel que pour les falaises qui ont un versant sud. Par conséquent, des éboulis plus élevés s'accumulent au-dessous des falaises donnant sur le nord.

#### Géomorphologie et processus

À l'extrémité est du labyrinthe, l'écoulement qui a provoqué l'érosion des chenaux s'est divisé et dirigé abruptement vers deux énormes chutes d'eau, semble-t-il, laissant le Dias comme lambeau d'érosion perché (fig. 3b). Les chenaux plus larges et plus profonds, à l'est, éclipsent ceux qui sont situés à l'ouest – le plus grand chenal a une largeur d'environ 600 m et une profondeur d'environ 250 m. Des chenaux plus profonds, à l'ouest, reflètent probablement l'érosion dans les parties abruptes, au-dessus de la dénivellation vers la vallée inférieure. Les chenaux anastomosés se divisent et se rejoignent de manière à former des configurations complexes et, contrairement aux chenaux de cours d'eau normaux, leurs jonctions sont habituellement discordantes : le plancher de l'un des chenaux est suspendu au-dessus du plancher d'un autre. Les jonctions sont discordantes quand un chenal s'érode plus rapidement que l'autre, et le niveau d'eau est à peu près le même dans les deux chenaux. Dans un tel cas, le chenal supérieur ne présente pas l'avantage d'une pente plus abrupte parce qu'il n'y a pas de pente de surface de l'eau accentuée à la jonction. Le cours d'eau dans le chenal se termine abruptement, et le chenal devient alors un bras mort qui ne rejoint pas d'autres chenaux (fig. 3a); au bras mort, l'eau qui cause l'érosion monte

Figure 4

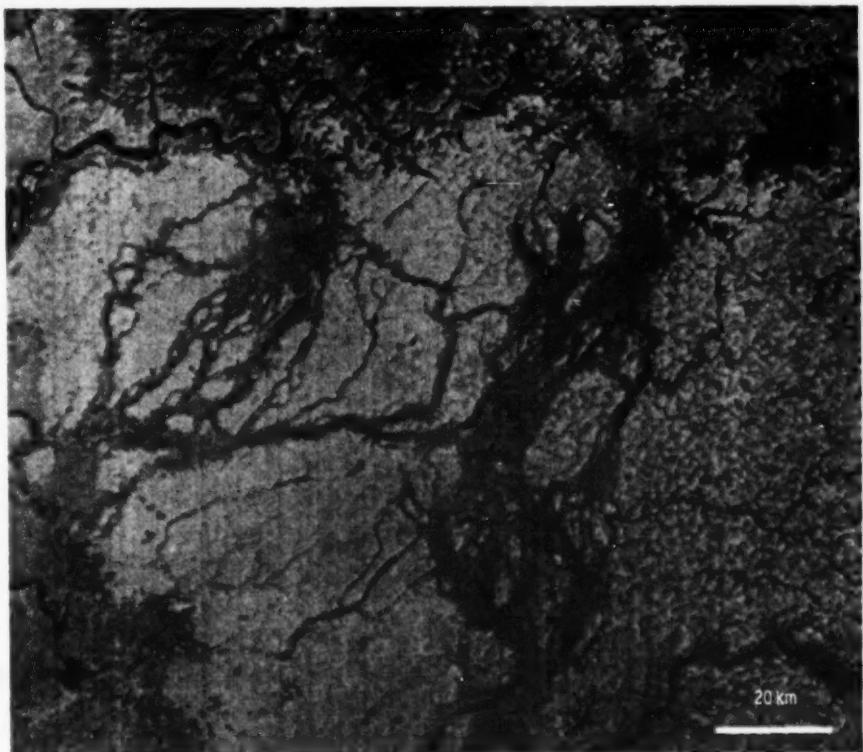
Image du Landsat des Channeled Scablands, Washington, avec deux éminents profils d'inondations anastomosés.

et s'intègre à un autre cours d'eau formant ainsi un torrent qui inonde les interfluves. Donc, les bras morts ont été submergés dans un grand flux. De puissants vortex ont creusé des marmites d'une profondeur allant jusqu'à 30 m à la jonction des canaux et sur les interfluves des chenaux (fig. 3a et b). Les marmites sur les interfluves et les bras morts prouvent que de grandes parties du paysage ont été inondées. Les preuves fournies par les chutes d'eau reliques, à l'est, et les s-forms (ondulations du fond formées par l'érosion dans le socle rocheux) sur les interfluves, montrent que l'eau a coulé de l'ouest à l'est. Les vallées formant une pente ascendante en direction est ont donc un gradient inverse, d'autres ont un long profil ondulé, et les deux doivent être créées par un flux pressurisé.

#### *Inondations et trajet des inondations*

L'extrême érosion a creusé des vallées et des marmites, et les puissants courants ont transporté des rochers de Beacon Sandstone dont le diamètre pouvait atteindre jusqu'à 3 m. Parallèlement, les eaux de fonte ont sculpté des formes paraboliques effilées dans la dolérite des vastes interfluves. Ces reliefs effilés ressemblent à des formes d'érosion au Canada créées par les courants d'eau de fonte qui ont rongé le socle rocheux. Donc, de nombreuses preuves montrent un puissant écoulement des eaux de fonte sur les interfluves et dans les chenaux.

À l'ouest du labyrinthe, le glacier supérieur Wright glisse à partir du plateau antarctique oriental et dans une large échan-



ture des monts transantarctiques (fig. 2). Les écoulements cataclysmiques qui ont érodé le labyrinthe doivent avoir suivi un trajet semblable.

#### **Les Channeled Scablands**

Le labyrinthe fournit un indice de l'un des épisodes d'érosion les plus spectaculaires qui aient eu lieu sur la Terre, et nous pourrions encore avoir du mal à expliquer l'origine des vallées aux flancs escarpés, des marmites, des marques d'érosion et des chutes d'eau géantes si les spécialistes n'avaient pas mis en évidence un paysage parallèle remarquable qu'on peut voir dans les Channeled Scablands de l'État de Washington, aux É.-U. (fig. 4 et 5). À partir du début des années 1920 jusqu'aux années 1950, J Harlen Bretz a compilé une multitude de preuves provenant des scablands qui appuient son hypothèse selon laquelle des inondations cataclysmiques ont provoqué des coulées et créé des chutes d'eau reliques entrecoupées par de longues crêtes, des

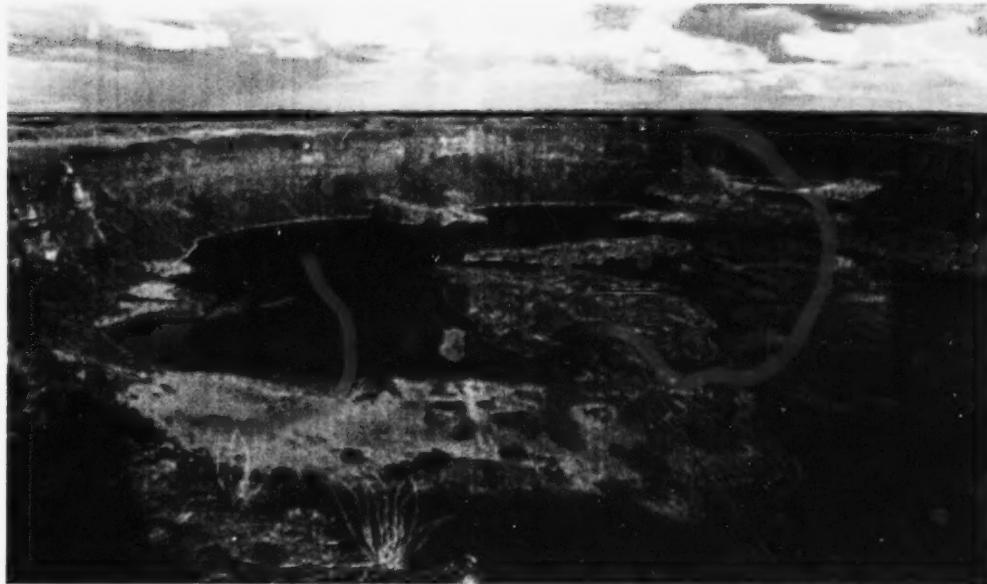


Figure 5  
Chutes sèches,  
Channeled Scab-  
lands, Washington.  
Les chutes ont une  
hauteur d'environ  
110 m. L'écoule-  
ment maximum a  
probablement sub-  
mergé entièrement  
les chutes et ainsi  
créé une légère  
pente à la surface  
de l'eau.

collines effilées, des buttes et des bassins, avec des marmites de dizaines de mètres de largeur et d'énormes rides (Bretz, 1969). Mais la géologie avait depuis longtemps renoncé au catastrophisme, et certains experts ont expliqué que les reliefs résultait de processus graduels qui se déroulent sur de longues périodes – une application erronée du principe de l'uniformitarisme. Bretz n'a pas suscité grand intérêt quand il a affirmé que l'étendue des reliefs des scablands avait nécessité des débits d'eau d'une énorme magnitude ( $\sim 10^6 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$ ). Pour ceux qui sont incapables de visualiser les paysages régionaux, les images satellites permettent maintenant d'estimer facilement l'étendue de ces inondations (fig. 4).

L'hypothèse extravagante avancée par Bretz a soulevé la colère des éminents membres du groupe de géologues américains qui l'ont vivement critiqué chaque fois qu'ils en avaient l'occasion. Même après la découverte du lac glaciaire Missoula, qui avait provoqué les inondations, l'opposition a été maintenue, et bon nombre de ses détracteurs sont demeurés sceptiques pendant le reste de leur vie. Suite à la remarquable conversion, en 1962, d'un groupe de spécialistes du quaternaire, lors d'une expédition sur le terrain organisée dans le cadre d'une conférence

de l'Association internationale pour l'étude quaternaire, presque tous les chercheurs qui avaient fait des études en géomorphologie ont abandonné l'idée que les scablands auraient connu des mégainondations. Les personnes qui avaient participé à la conférence lui ont envoyé un célèbre télégramme contenant le message suivant : « Maintenant, nous sommes tous des catastrophistes » (traduction). Heureusement, il a vécu assez longtemps pour profiter de son succès, en ayant la satisfaction d'avoir survécu à ses détracteurs.

### **Relation entre les scablands et le labyrinthe**

L'un des sceptiques, qui accompagnait Bretz lors d'une excursion dans la zone des scablands, en 1952, était Harold Theodore Uhr Smith. Celui-ci a acquis la ferme conviction qu'il y avait eu des inondations cataclysmiques. Dans quelques pages illustrées par une spectaculaire photo oblique, Smith (1965) a eloquemment expliqué que le labyrinthe était en fait un scabland ou terrain érodé, mais qu'il présentait des différences significatives. Les vallées du labyrinthe sont les coulées des scablands, et ses rochers sculptés par l'eau sont les collines effilées des scablands. Les deux paysages ont en commun de gigantesques chutes d'eau. Les

dépôts ont creusé des ridges géantes dans les scablands, mais l'érosion a sculpté des ondulations semblables dans le socle rocheux du fond de la vallée Wright, en aval du labyrinthe. Toutefois, si les inondations des scablands sont manifestement le résultat du déversement des eaux du lac Missoula, un lac de barrage glaciaire d'un volume d'environ  $2\,100\text{ km}^3$ , à aucun endroit des conditions semblables (lac subaérien) n'ont pu causer les inondations du labyrinthe – celui-ci est trop proche de la ligne de partage des eaux des monts transantarctiques et de l'inlandsis antarctique oriental.

#### *Provenance des eaux pour les inondations du labyrinthe*

Les jonctions discordantes, les vallées aveugles, les chenaux à gradient inversé et les longs profils ondulés laissent supposer que des énormes inondations se sont produites, ce qui indique que des écoulements sous-glaciaires se sont produits sous l'effet de la pression hydrostatique. L'eau présente sous le glacier de la vallée Wright, sous l'effet des extrêmes gradients de pression, doit avoir causé l'érosion dans les chenaux du labyrinthe. Mais comme l'espace insuffisant entre le labyrinthe et les monts transantarctiques, à l'ouest, ne se prêtait pas à l'accumulation d'eau, le réservoir se trouvait probablement sous l'inlandsis antarctique oriental, et les inondations cataclysmiques se sont produites le long du tracé de l'actuel glacier supérieur Wright. À cet égard, la vallée Wright n'est pas unique; d'autres inondations se sont produites dans les monts transantarctiques et creusé les scablands, au nord.

En 1965, quand Smith a écrit des textes sur le labyrinthe, les scientifiques qui s'intéressaient à l'Antarctique connaissaient l'existence de seulement quelques lacs sous-glaciaires dont l'origine était mal comprise, et les idées de Bretz venaient à peine d'être acceptées. En tant qu'étudiant au Royaume-Uni à l'époque, j'étais loin de connaître l'existence des scablands ou du labyrinthe, et même en 1976, le plus populaire manuel d'enseignement sur la géomorphologie glaciaire au Royaume-Uni ne les mentionnait pas. Bien qu'il ne s'en soit pas rendu compte, Smith avait fait des observations et présenté un raisonnement qui laissaient supposer l'existence de très grands lacs d'eau de fonte instables au-dessous des nappes de glace. Aujourd'hui, Robin

Bell (2008) signale l'existence d'une multitude de lacs situés au-dessous des actuels inlandsis et courants glaciaires de l'Antarctique dont les eaux de certains se déversent subitement entre l'un à l'autre. À l'évidence, c'est le drainage de lacs bien plus grands qui a érodé le labyrinthe. Ces plus grands lacs pourraient bien se reformer.

#### *Magnitude de l'écoulement et âge des inondations du labyrinthe*

Quel était le débit d'eau dans le labyrinthe, et quand les inondations se sont-elles produites? Les pointes de crues ont sans doute submergé les grandes vallées, même si celles-ci n'avaient peut-être pas été entièrement formées lorsque les inondations se sont produites. Un argument semblable s'applique aux chenaux anastomosés des scablands. D'après les estimations des sections transversales d'écoulement (en supposant que les chenaux aient été pleins) et de la vitesse nécessaire pour le transport des plus gros rocs dans les chenaux, les calculs d'Adam Lewis et d'autres spécialistes (2006) ont donné une décharge d'eau de  $1,6\text{--}2,2 \times 10^6\text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , soit un débit bien en deçà des estimations pour les inondations des scablands.

La datation à l'argon de la sanidine, un minéral qu'on trouve dans les cendres des volcans sur le plancher des chenaux, donne un âge minimum qui se situe à peu près au milieu du Miocène, soit environ 12 M.A. avant maintenant (Lewis et autres, 2006).

### Côte Soya

#### *Roche sculptée (s-forms) et inondations*

Existe-t-il des preuves d'autres mégainondations qui se seraient produites dans l'Antarctique? Takanobu Sawagaki et Kazuomi Hirakawa (1997) ont trouvé des surfaces de roche sculptées grugées par l'écoulement à haute vitesse des eaux de fonte le long de la côte Soya (fig. 1 et 6). Ces surfaces montrent les mêmes marques en forme de croissants, dépressions asymétriques, formes de virgule, marmites, drumlins rocheux (s-forms) que le socle rocheux érodé par l'eau sur le granite et le gneiss du Bouclier canadien. Elles sont à la marge de l'inlandsis antarctique oriental et donnent un indice de l'écoulement des eaux de fonte sur l'ensemble des collines rocheuses de plus de 300 m de

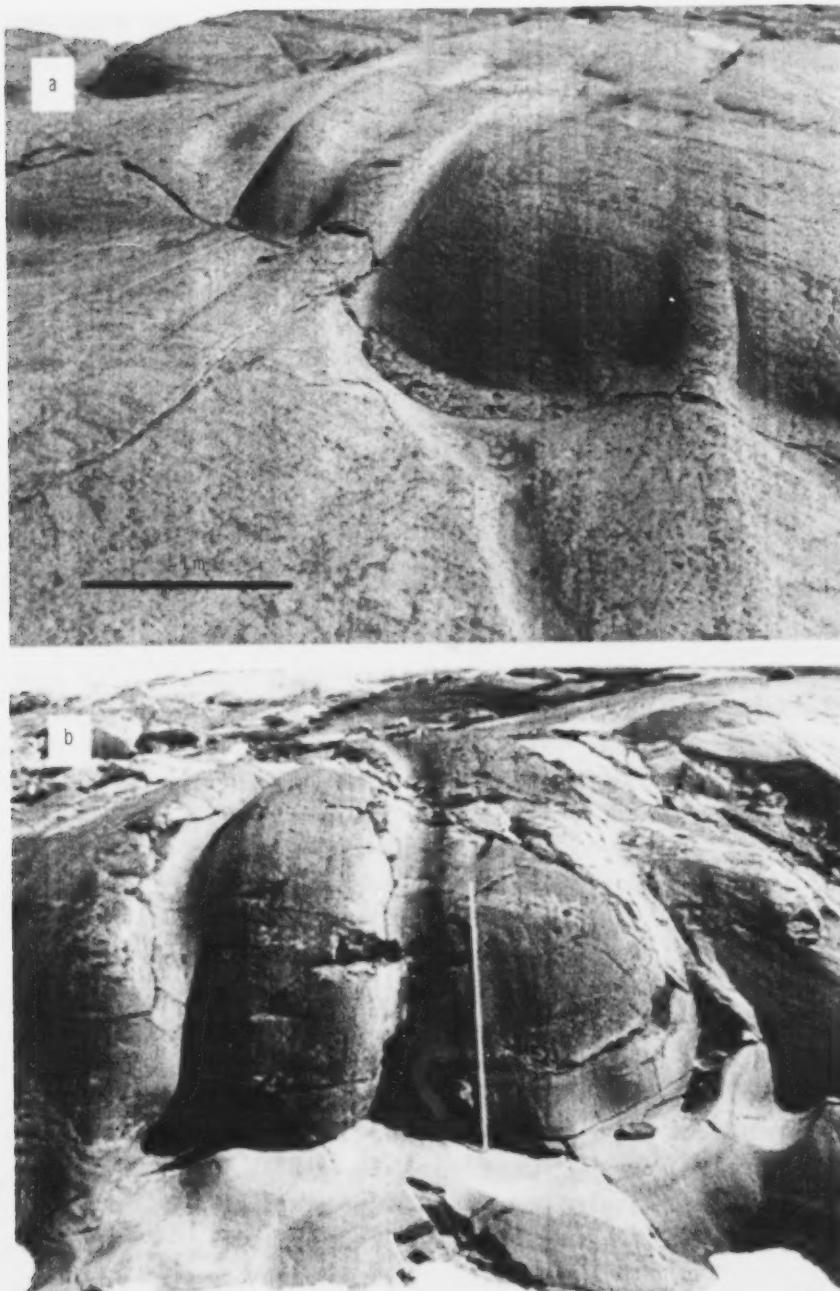
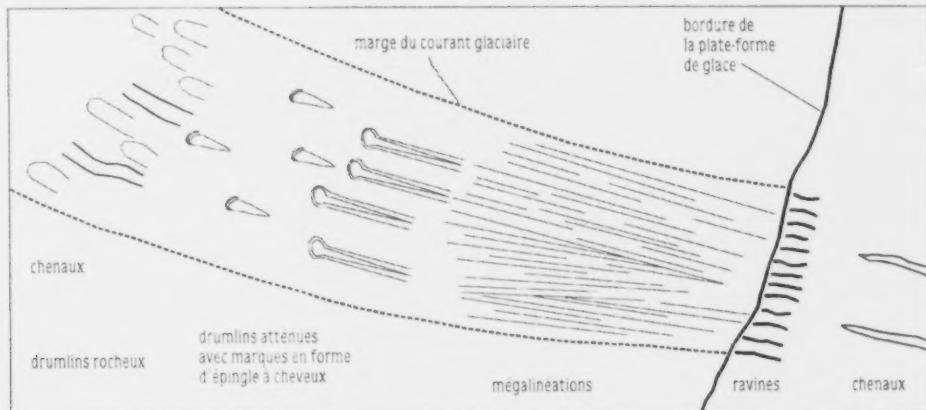


Figure 6

Marques d'érosion causée par l'eau de fonte (S-forms) résultant des inondations en nappe au-dessous de l'inlandsis antarctique oriental, côte Soya, Antarctique. L'écoulement suit la direction opposée à celle où se trouve la personne qui regarde. Les deux images montrent des marques en forme de croissants liées à la production de vortex autour du côté amont des obstacles de roc. Gracieuseté de Takanobu Sawagaki.

hauteur. Comme l'eau s'écoulait sur un relief aussi élevé, elle devait provenir d'une décharge sous forte pression. La largeur minimum des écoulements en nappes qui ont érodé le socle rocheux de la côte Soya tourne autour de 80 km, et comparativement aux écoulements qui se sont produits au Canada sur le roc sculpté, les estimations de débits d'environ  $10^6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  sont à peu près égales à celles des décharges pour les écoulements sous-glaciaires dans les scablands et le labyrinth. Il va sans dire que l'apport permanent de chaleur géothermique en milieu sous-glaciaire et la fonte sous pression ou supraglaciaire ne peuvent alimenter des décharges d'une telle ampleur. Sawagaki et Hirakawa ont donc conclu que l'eau de fonte libérée par les très grands lacs, au-dessous de l'inlandsis antarctique oriental, a érodé le socle rocheux le long de la côte Soya.

Figure 7  
Géomorphologie des creux en travers du plateau.



Les spécialistes sont presque certains que certaines inondations sous-glaciaires au-dessous de l'inlandsis antarctique datent des temps anciens – le labyrinthe a été formé au Miocène. La dolérite grandement altérée par les agents atmosphériques et de vastes talus d'éboulis qui s'élevaient face aux falaises des canyons disséquées en cheminées abruptes reflètent l'antiquité. Cependant, des surfaces beaucoup moins altérées le long de la côte Soya montrent une érosion plus récente – les longues périodes d'altération effacent les délicates marques d'érosion. Sawagaki et Hirakawa indiquent que des débâcles pourraient s'être produites à peu près à l'époque du dernier maximum glaciaire (DMG), soit environ 15 000 années avant nos jours.

## Le plateau continental

### *Historique de la recherche*

La recherche sur le plateau continental antarctique, notamment à l'ouest de la péninsule antarctique (fig. 1), révèle une structure fascinante et répétée de formes créées par l'érosion associée à des dépressions profondes en travers du plateau (fig. 7). La bathymétrie par secteurs, un système où de multiples faisceaux sonars permettent d'établir une grille bathymétrique du plancher des océans, a rendu cette recherche possible. Les reconstructions sous forme de cartes à relief ombré présentent des images étonnantes du paysage marin qui ressemblent à des photos (fig. 8 et 9). Les images bathymétriques montrent de vastes

sections d'ondulations sur le fond des océans, ce qui permet de dresser des cartes donnant des détails jamais vus auparavant. Les perfectionnements technologiques favorisent le progrès intellectuel et les découvertes.

Les sections interne, externe et centrale subdivisent les dépressions en travers du plateau qui ont des dizaines kilomètres de largeur, des centaines de kilomètres de longueur et jusqu'à 1 000 m de profondeur. Le plancher océanique s'élève vers l'ouverture des creux. Des bassins profonds creusés dans le solide socle rocheux occupent les zones où les courants glaciaires ont pris naissance, dans certains creux.

### *Scablands sillonnés de chenaux sur la plate-forme interne*

Le socle rocheux cristallin, au-dessous de la plate-forme interne, donne un paysage marin accidenté comportant des plateaux et de profonds chenaux – un scabland identique aux Channeled Scablands et au labyrinthe (fig. 8). Ashley Lowe et John Anderson (2003) ont décrit un chenal d'une largeur de 2,5 km et d'une profondeur de 400 m – bien plus grand que ceux des scablands et du labyrinthe. Les bras morts des chenaux n'ont pas de dégorgeoir, et les longs profils des autres chenaux sont ondulés. De nombreux chenaux s'anastomosent et forment des configurations complexes montrant des bras discordants suspendus. Lowe et Anderson ont signalé l'existence de s-forms sculptées par les eaux de fonte (ils ont appelé ces marques d'érosion « p-forms » – pour mouvements plastiques – mais je préfère le terme « s-forms » – pour sculptées) sur les interfluves du socle rocheux. À

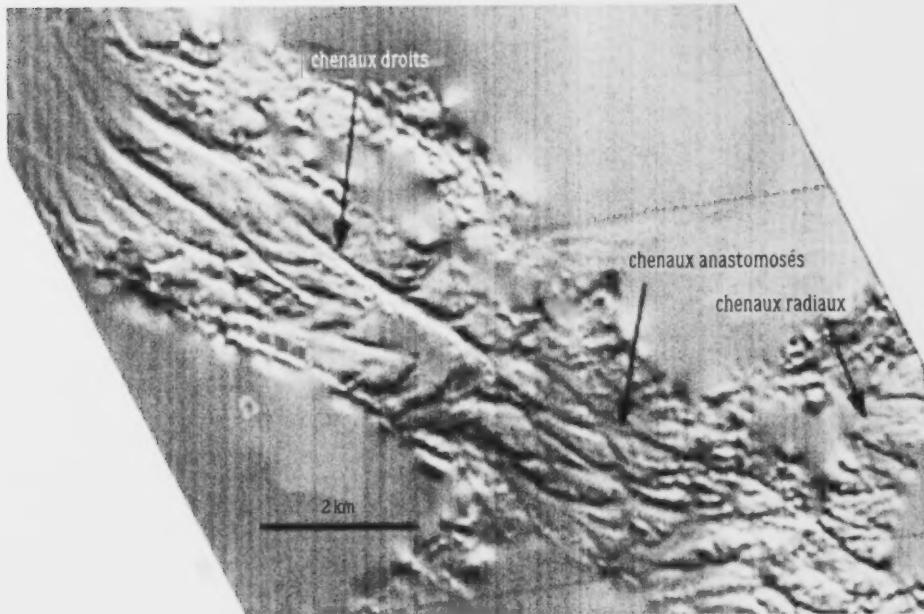


Figure 8

Image résultant de la bathymétrie par secteurs d'un scabland sillonné de chenaux, au point de naissance d'un paléo-courant glaciaire, dans la baie Maguerite. (Anderson et Fretwell, 2008).

Gracieuseté de John Anderson.

l'évidence, les inondations ont submergé ces grands chenaux, pour les raisons correspondant à l'explication sur les écoulements dans le labyrinth.

Le paysage marin de la plate-forme interne montre que les eaux de fonte ont provoqué des déversements considérables. Dans des conditions semblables à celles qui ont provoqué l'excavation du labyrinth, les eaux de fonte ont disséqué le solide socle rocheux, creusant ainsi des chenaux sur la plate-forme interne. Les longs profils ondulants de certains chenaux sont des signes d'écoulement sous-glaciaire pressurisé. De nombreux chenaux-tunnels de la plate-forme interne éclipsent les chenaux du labyrinth et des scablands et ont sans doute transporté des décharges égales, voire plus considérables – prudemment estimées à  $-10^6 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$ . Lowe et Anderson ont noté la possibilité que des écoulements aussi extrêmes se produisent et indiqué qu'aux ères antérieures les eaux de fonte pourraient avoir été abondantes au-dessous d'un courant glaciaire, dans le creux de Pine Island Bay.

#### *Drumlins sur les plates-formes interne et centrale*

Les drumlins (formes du fond allongées avec extrémités arron-

dies en amont et queue effilée) figurent parmi les reliefs les plus faciles à reconnaître, mais ce sont ceux dont il est le plus difficile d'expliquer l'origine. Le problème des drumlins, qui a généré bon nombre de célèbres scientifiques, demeure épique. En fait, les formes du fond du plateau antarctique avec leurs images à haute résolution obtenues grâce à la bathymétrie par secteurs et l'évident contexte glaciologique pourraient bien fournir la clé qui permettrait de comprendre ces énigmatiques collines de forme elliptique. Cette possibilité m'a incité ainsi qu'André Pugin, de la Commission géologique du Canada, et Robert Young, de l'Université de la Colombie-Britannique, à étudier les paysages marins de l'Antarctique. Jusqu'à tout récemment, les principales explications sur la formation des drumlins tenaient aux idées exprimées sur la déformation des sédiments au-dessous des courants glaciaires et sur l'érosion du lit causée par le déversement soudain des eaux de fonte. Or, Tom Bradwell et d'autres spécialistes (2008) ont démontré qu'il était peu probable que les drumlins soient le résultat de la déformation, parce que le socle rocheux est le substrat de nombreux drumlins dans le nord-ouest de l'Écosse. Ils ont affirmé qu'il faudrait plutôt

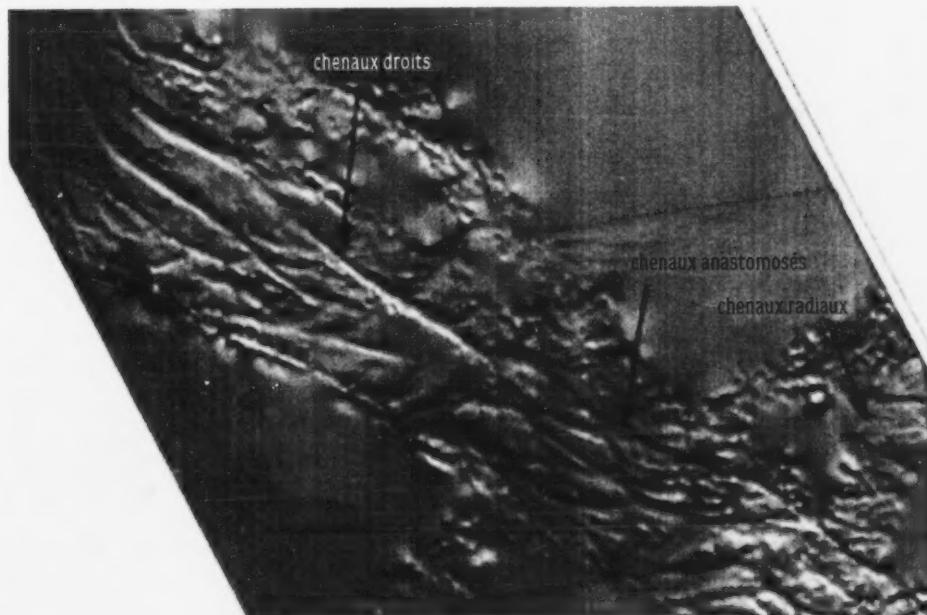


Figure 8  
Image résultant de la bathymétrie par secteurs d'un scabland sillonné de chenaux, au point de naissance d'un paléo-courant glaciaire, dans la baie Maguerite. (Anderson et Fretwell, 2008). Gracieuseté de John Anderson.

l'évidence, les inondations ont submergé ces grands chenaux, pour les raisons correspondant à l'explication sur les écoulements dans le labyrinthe.

Le paysage marin de la plate-forme interne montre que les eaux de fonte ont provoqué des déversements considérables. Dans des conditions semblables à celles qui ont provoqué l'excavation du labyrinthe, les eaux de fonte ont disséqué le solide socle rocheux, creusant ainsi des chenaux sur la plate-forme interne. Les longs profils ondulants de certains chenaux sont des signes d'écoulement sous-glaciaire pressurisé. De nombreux chenaux-tunnels de la plate-forme interne éclipseront les chenaux du labyrinthe et des scablands et ont sans doute transporté des décharges égales, voire plus considérables – prudemment estimées à  $\sim 10^6 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$ . Lowe et Anderson ont noté la possibilité que des écoulements aussi extrêmes se produisent et indiqué qu'aux ères antérieures les eaux de fonte pourraient avoir été abondantes au-dessous d'un courant glaciaire, dans le creux de Pine Island Bay.

#### *Drumlins sur les plates-formes interne et centrale*

Les drumlins (formes du fond allongées avec extrémités arron-

dies en amont et queue effilée) figurent parmi les reliefs les plus faciles à reconnaître, mais ce sont ceux dont il est le plus difficile d'expliquer l'origine. Le problème des drumlins, qui a généré bon nombre de célèbres scientifiques, demeure épique. En fait, les formes du fond du plateau antarctique avec leurs images à haute résolution obtenues grâce à la bathymétrique par secteurs et l'évident contexte glaciologique pourraient bien fournir la clé qui permettrait de comprendre ces énigmatiques collines de forme elliptique. Cette possibilité m'a incité ainsi qu'André Pugin, de la Commission géologique du Canada, et Robert Young, de l'Université de la Colombie-Britannique, à étudier les paysages marins de l'Antarctique. Jusqu'à tout récemment, les principales explications sur la formation des drumlins tenaient aux idées exprimées sur la déformation des sédiments au-dessous des courants glaciaires et sur l'érosion du lit causée par le déversement soudain des eaux de fonte. Or, Tom Bradwell et d'autres spécialistes (2008) ont démontré qu'il était peu probable que les drumlins soient le résultat de la déformation, parce que le socle rocheux est le substrat de nombreux drumlins dans le nord-ouest de l'Écosse. Ils ont affirmé qu'il faudrait plutôt

attribuer leur origine à l'abrasion par la glace. Mais cela suppose que les drumlins qui présentent la même forme résultent de la déformation dans les sédiments mous et de l'abrasion du solide socle rocheux; une explication trop compliquée.

Le scabland sillonné de chenaux, sur la plate-forme interne, inclut des drumlins relativement courts, larges et élevés, ce qui contraste avec les drumlins de forme allongée des plates-formes externe et centrale (fig. 9a et 10a). Comme les crags et les queues, les drumlins rocheux sont fort répandus. Les marques en épingle à cheveux, sur toute la surface de ces drumlins, comprennent des marques en forme de croissant autour des extrémités arrondies en amont et des sillons latéraux qui s'élargissent à mesure que les drumlins s'amincent, en aval – la forme des drumlins dépend de la forme des lignes de grugement.

Les creux couverts de sédiments, sur la plate-forme centrale, incluent les petites parties exposées du socle rocheux qui ont servi d'obstacles à la formation des drumlins. Les marques en épingle à cheveux se sont formées autour de ces obstacles et caractérisent les drumlins amincis et atténus sur les plates-formes interne et centrale (fig. 9a). Des marques d'érosion (queues de rats), sculptées dans du plâtre de Paris par de l'eau qui coule rapidement offrent une bonne analogie pour ces drumlins (fig. 9b). Les expériences qui ont été menées montrent des vortex en fer à cheval entourant la face amont des obstacles, qui érodent des dépressions en épingle à cheveux et laissent des queues de rats. Nous pourrions même décrire les drumlins atténus, sur la plate-forme centrale, comme des mégagueues de rats. L'utilisation de vortex en fer à cheval pour expliquer l'origine des drumlins et des queues de rats crée un lien de dynamique des fluides qui renforce l'analogie.

#### Mégalinéations sur les plates-formes centrale et externe

Sauf pour quelques exceptions, des sédiments recouvrent une grande partie de la plate-forme centrale et presque toute la plate-forme externe où des scientifiques, notamment des États-Unis et du Royaume-Uni, ont cartographié de vastes zones de crêtes très allongées et de creux appelés collectivement linéations glaciaires à méga-échelle (LGME; fig. 10a, de Ó Cofaigh et autres, 2002). Ces formes du fond particulières dominent le

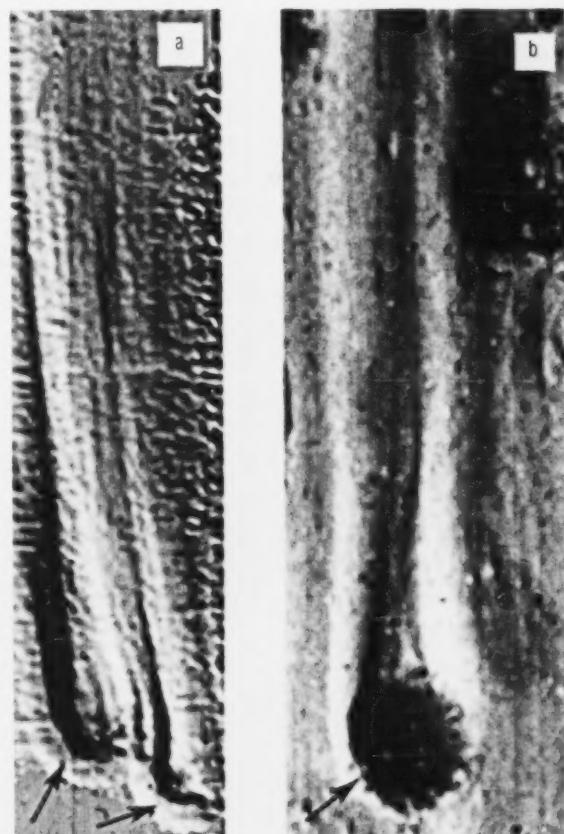


Figure 9

a) Bathymétrie par secteurs de drumlins atténus avec marques en forme de croissants (flèche) et sillons latéraux qui s'élargissent en aval. Marguerite Bay: écoulement vers le haut. échelle en km. Provenance: Ó Cofaigh et autres (2002). b) Queue de rat érodée dans une coulée rapide (plâtre de Paris) par des eaux turbulentes légèrement acides. Les flèches montrent les marques en forme de croissants; écoulement vers le haut, échelle en cm. À noter comment l'effillement est causé par des grugements latéraux qui s'élargissent en aval.

paysage marin sur la plate-forme externe. La croyance fort répandue que la déformation sous-glaciaire moule les LGME suppose que ces formes sont d'origine glaciaire. Le terme «mégalinéation», qui est plus simple, évite cette présomption. Si on

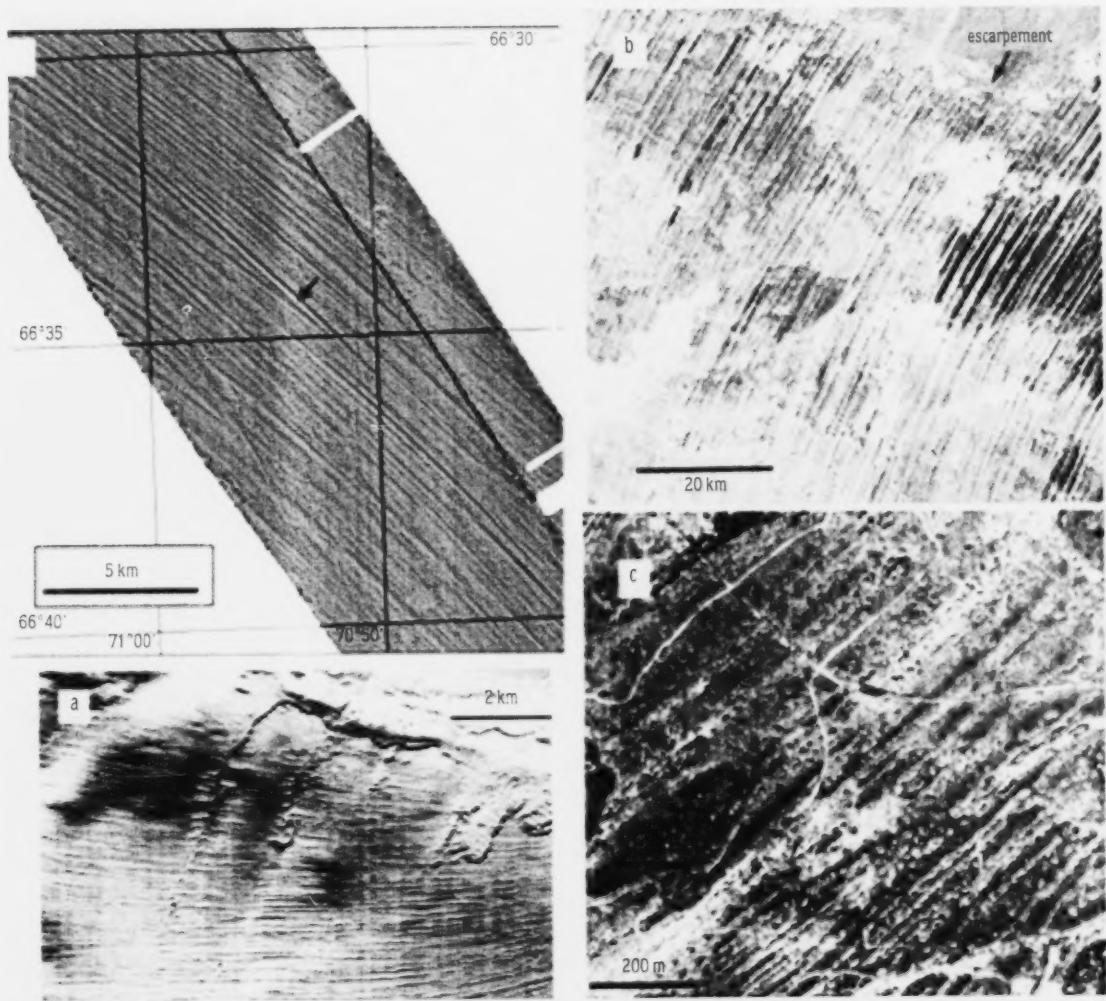


Figure 10

Mégalinéations dans une variété de milieux: a) Image résultant de la bathymétrie par secteurs de mégalinéations érodées de manière à former des diamictons mous sur le fond de la baie Marguerite (provenance: Ó Cofaigh et autres, 2002); b) Image satellite de mégalinéations éoliennes (yardangs) érodées dans le grès, région de Borkou, Chad (Google Earth); c) Mégalinéations (sillons) érodées dans la boue par les courants marins sur le fond, golfe du Mexique (provenance: Lee et George, 2004); d) Image satellite des mégalinéations des scablands (affouillement du substrat rocheux) érodées dans le basalte par des déversements soudains, Dry Falls, État de Washington.

suppose une amplitude allant jusqu'à 30 m, bien qu'elle soit habituellement plus proche de 15, un espace transversal de quelques centaines de mètres et des longueurs pouvant atteindre des dizaines de mètres, les mégalinéations figurent parmi les plus grandes formes de fond sur la Terre. Elles présentent des ratios longueur-largeur bien supérieurs à ceux des drumlins; donc les deux éléments sont des entités distinctes. Les mégalinéations, qui sont remarquablement parallèles et uniformément espacées, s'étendent sur des dizaines de kilomètres et peuvent présenter de grandes courbures qui suivent les courbes des

creux. Les linéations entrecroisées marquent un changement dans la direction de l'écoulement, et les linéations situées le plus souvent aux gradins orientés vers l'avant montrent que la morphologie des fonds a influencé l'écoulement.

### Hydrologie des creux en travers du plateau

#### *Eau de fonte minime*

Des opinions très différentes sur l'hydrologie des creux en travers du plateau laissent beaucoup de place aux débats. Comme je l'ai indiqué, Ashley Lowe et John Anderson ont mentionné «des eaux de fonte abondantes» lors d'une interprétation antérieure sur les chenaux et les s-forms dans le socle rocheux. Bob Gilbert et d'autres spécialistes (2003) ont utilisé l'analogie des queues de rats pour justifier leur hypothèse que les drumlins rocheux résultent de l'érosion causée de grandes inondations à Palmer Deep, au large de la péninsule antarctique. Mais ces idées ont été accueillies avec scepticisme par d'autres scientifiques qui ont nié toutes les preuves de fortes décharges d'eau de fonte au-dessous des courants glaciaires, dans les creux – ici, il faut absolument comprendre la nature des preuves et savoir les interpréter. Les sceptiques ont estimé les eaux de fonte minimales en ce qui concerne les reliefs du fond sur le plateau et indiqué que l'eau de fonte résultait peut-être de la fonte due à la chaleur géothermique et de friction, de la fonte sous pression et de la chaleur provoquée par des contraintes. Cependant, ces sources d'eau sous-glaciaire ne justifient pas l'hypothèse des décharges estimées pour les chenaux-tunnels. L'hypothèse de l'eau de fonte minime ne tient pas compte de l'écoulement provenant des chenaux-tunnels, mais elle explique l'origine des marques en forme de croissants visibles autour des drumlins en indiquant que celles-ci sont apparues tard, à l'échelle locale, et laisse supposer que les s-forms sont des caractéristiques glaciaires, et non pas fluviales. Les mécanismes mentionnés pour le mouvement des eaux de fonte sur l'ensemble des plates-formes incluent les écoulements de Darcy et l'advection puisque l'eau de porosité déforme les sédiments sous-glaciaires, mais ces deux mécanismes ne pourraient pas justifier le transport de l'eau dans les chenaux-tunnels, ni entraîner des décharges appréciables. En outre, les explications basées sur l'eau de fonte minime pour les

marques en forme de croissants et les s-forms ne se justifient pas sur le plan théorique, observationnel et expérimental.

#### *Eau de fonte abondante*

Vu les difficultés attribuables à l'hypothèse de l'eau de fonte minime, il faudrait reconsidérer l'autre option, c'est-à-dire celle de l'eau de fonte abondante. Et surtout, dans ce débat, il est bien évident que la fonte permanente ne peut fournir l'eau pour les déversements soudains qui ont formé les chenaux-tunnels sur la plate-forme interne : l'eau de fonte s'est accumulée dans les grands lacs sous-glaciaires et a été libérée lors de cataclysmes. Cette reconstitution cadre avec notre conclusion que le paysage marin de la plate-forme interne est un labyrinthe ou un scabland. Les déversements soudains de ces lacs ont probablement entraîné des décharges de  $10^6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , mais il n'y a pas de chenaux, ni d'eskers (crêtes de sable et de gravier déposé dans les tunnels des glaciers) qui indiquent des voies étroites sur les deux plates-formes externes. Par conséquent, les décharges des inondations provenant des chenaux-tunnels doivent s'être répandues dans un vaste torrent sur l'ensemble des plates-formes centrale et externe. L'écoulement en nappe à haute vitesse sur un lit mou érodable crée inévitablement des formes de fond vu son interaction avec le fond (dunes éoliennes, dunes des déserts, courants de marée, vagues de sable, etc.).

### Mégalinéation et eau de fonte abondante

#### *Mégalinéations*

Des mécanismes persistants ont généré des mégalinéations sur la plate-forme externe (fig. 10a) où il n'y a pas d'obstacles évidents sur le lit marin. Le creusage de sillons par la base des glaciers (en forme de quille) pourrait façonner de telles mégalinéations, mais à certains endroits celles-ci s'étendent en aval à partir de vastes zones de sédiments mous sans linéations. Étant donné cette relation spatiale, deux possibilités improbables peuvent être envisagées : soit que la base des glaciers n'a pas creusé les sédiments mous dans les zones sans linéations, ou qu'elle s'est formée et a ainsi créé des linéations. La formation d'une base en forme de quille est peu probable s'il n'y a pas de socle rocheux résistant qui peut mouler le lit du glacier. Quoiqu'il en

soit, le creusage de sillons est confronté à des difficultés insurmontables. En outre, le creusage ne justifie pas la bifurcation des mégalinéations et le fait qu'elles soient le plus souvent situées aux gradins. Or, dernièrement Christian Schoof et Garry Clarke (2008) ont indiqué que le rainurage à grande échelle pourrait résulter d'écoulements en spirale dans la partie basale des glaciers – une voie très prometteuse pour la recherche sur les mégalinéations de l'Antarctique.

André Pugin, Robert Young et moi-même avons (2008) affirmé que l'érosion provenant des eaux de fonte avait sculpté les mégalinéations. Après avoir démontré la probabilité de très grands écoulements dans les creux en travers du plateau, nous nous sommes attaqués aux objections les plus courantes à l'hypothèse des mégalinéations pour les mégalinéations en milieu glaciaire : l'eau d'un écoulement turbulent ne peut pas engendrer des formes de fond entrecroisées, et elle ne peut pas éroder le fond en grandes linéations parallèles uniformément espacées. Ces objections proviennent du texte de référence de Chris Clark (1993) sur les mégalinéations.

Le problème des formes du fond entrecroisées se résout facilement par la simple logique :

Il faut un certain temps pour qu'un écoulement en nappe stable d'eau de fonte érode un groupe de formes du fond longitudinales présentant une certaine orientation. Si la direction de l'écoulement change à cause d'une géométrie changeante, il faut encore plus de temps pour supprimer le premier groupe et pour éroder un nouveau groupe de formes présentant une nouvelle orientation. Donc, entre le moment où commence l'érosion du premier groupe et celui où le deuxième groupe est entièrement supprimé, il y aura au moins deux groupes de marques d'érosion entrecroisées. Plusieurs changements dans la direction de l'écoulement peuvent générer de multiples groupes entrecroisés.

À l'évidence, l'entrecroisement ne contredit pas la formation de mégalinéations par l'eau de fonte.

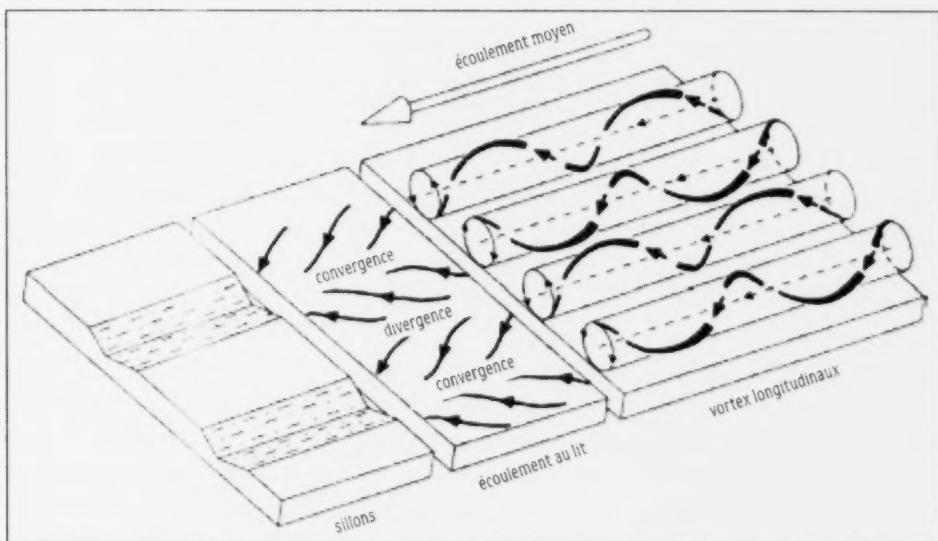
En l'absence d'une théorie générale sur la dynamique des fluides pour les formes de fond, l'analogie apporte la meilleure réponse à la question concernant les vastes linéations parallèles uniformément espacées : si les grandes marques de fond paral-

lèles uniformément espacées résultent de l'érosion causée par des écoulements turbulents dans des milieux non glaciaires, ces caractéristiques ne peuvent servir de preuves pour réfuter l'idée que les linéations ont été formées par des écoulements turbulents sous-glaciaires. En fait, des analogies géométriques convaincantes appuient l'idée des mégalinéations créées par l'eau de fonte.

L'abrasion par le sable et le silt transportés par les alizés du nord-est sculpte les roches de désert et les transforme en remarquables yardangs parallèles (crêtes et sillons) qui pourraient être les meilleurs analogues pour les mégalinéations en milieu glaciaire. Les crêtes de roche sculptée par le vent dont la hauteur atteint jusqu'à 100 m (longueur d'onde transversale d'environ 200 m) et la longueur couvre des dizaines de kilomètres donnent une forme cannelée à de vastes surfaces dans les déserts (fig. 10b). Les yardangs dans des champs d'une largeur qui atteint des centaines de kilomètres suivent les alizés, formant de vastes courbes à grand rayon. Les deux groupes de linéations, soit les mégalinéations en milieu glaciaire et les yardangs des déserts, commencent habituellement aux gradins orientés vers l'avant (face au flux ascendant) (fig. 10b). Donc, les yardangs sont des mégalinéations d'une amplitude relativement élevée. Leur formation dans un grand écoulement turbulent laisse supposer qu'il existe une forte analogie de dynamique des fluides entre les linéations glaciofluviales et les linéations éoliennes.

Eddie Lee et Tony George (2004) ont signalé l'existence de vigoureux courants de fond créés par les gradients de densité saline qui creusent des sillons sur le plancher du golfe du Mexique, à une profondeur d'environ 3 000 m (fig. 10c). Ces sillons parallèles à la direction de l'écoulement imitent les mégalinéations dans un environnement glaciaire et les yardangs dans les déserts. Ils sont espacés de 50–150 m, et leur profondeur atteint 5–10 m; ils peuvent couvrir une distance de 50 km. Leur grande courbure suit la bathymétrie du fond marin; les groupes de sillons s'entrecroisent, et les sillons individuels peuvent bifurquer. Ces mégalinéations marines ressemblent beaucoup à celles observées sur les plates-formes antarctiques et contredisent l'affirmation que les linéations sur les plates-formes ne peuvent se former dans des écoulements turbulents.

Figure 11  
Formation de mégalinéations sous l'effet de vortex longitudinaux.  
Provenance: Flood (1983).



Compte tenu des analogies précitées, nous nous attendons à trouver des mégalinéations dans des zones affouillées par des inondations bien documentées, comme dans les scablands. Donc, le fait qu'on ait observé des mégalinéations dans le basalte juste en amont de la plus grande chute d'eau relique des scablands, Dry Falls, ne surprend personne (fig. 5 et 10d). Comme les scablands s'étendent bien au-delà des nappes glaciaires du Pléistocène, ce sont les débordements soudains, et non pas les processus glaciaires, qui ont sculpté ces linéations. Celles-ci couvrent une distance de 1 km jusqu'à Dry Falls (longueur limitée), leur amplitude atteint environ 5 m, et elles sont espacées d'environ 50–100 m. Les sillons montrent des coupes transversales en forme de U. Dans cette analogie, l'hydrologie glaciaire montre une relation entre les scablands et les linéations sous-glaciaires.

Les eaux de fonte ont aussi érodé des mégalinéations dans le substrat rocheux sédimentaire et métamorphique, en Écosse, dans les roches sédimentaires de la Manche, dans la pierre calcaire en Ontario, dans le granite et le gneiss du Bouclier canadien, ainsi que dans les sédiments glaciaires et le substrat rocheux sédimentaire mal cimenté, dans les Prairies du Canada. De nombreux autres paysages, notamment dans le Nord canadien, qui comportent la plus grande zone de formes de fond sous-glaciaires de la Terre, montrent des mégalinéations qui pour-

raient être d'origine glaciofluviatile. Le paysage marin du plateau antarctique et le contexte glaciaire pourraient fournir un puissant modèle pour la genèse de tels paysages.

Si le processus d'érosion peut être rattaché à la dynamique des fluides, cela donnera plus de poids à notre analogie. La plupart des chercheurs qui étudient les mégalinéations dans les environnements non glaciaires suivent l'information fournie par Roger Flood (1983); ils les attribuent à l'érosion causée par des vortex longitudinaux (fig. 11). Les preuves obtenues lors des expériences menées sur le terrain appuient ce point de vue pour ce qui est des dunes longitudinales (sifs), et la recherche empirique exécutée par Jon Williams et d'autres spécialistes (2008) démontre le rôle des vortex longitudinaux dans la formation de crêtes-dépressions parallèles à la direction de l'écoulement sur les bas fonds intertidaux, dans l'estuaire du fleuve Severn, au R.-U. Les récents perfectionnements dans la dynamique des fluides numériques pour les écoulements turbulents aux gradins orientés vers l'avant montrent des vortex vers l'aval des gradins. Donc, la dynamique des fluides apporte une explication sur la formation des linéations aux gradins, dans des milieux éoliens qui étaient autrefois englacés. Cet arrangement spatial va bien au-delà de la simple coïncidence.

## Conclusion

Des paysages d'érosion antarctiques spectaculaires qu'on trouve dans le labyrinthe, le long de la côte Soya, et dans l'environnement marin des scablands, sur le plateau continental, apportent la preuve que des déversements soudains cataclysmiques se sont produits au-dessous des inlandsis antarctiques. L'énorme volume de ces inondations ne peut s'expliquer par la fonte permanente : pour que de tels incidents se produisent, il faut que l'eau se soit accumulée dans des lacs sous-glaciaires beaucoup plus grands que ceux que l'on a trouvés au-dessous des inlandsis actuels. L'endroit où se trouve le labyrinthe, proche des monts transantarctiques, et les marques d'érosion le long de la côte Soya, près de l'inlandsis antarctique oriental, indiquent que les eaux de fonte sous-glaciaire se sont accumulées dans les lacs. L'accumulation et la libération de ces eaux demandent des mécanismes pour que ces lacs se scellent et pour que le sceau se brise subitement. Ed Shoemaker (1991) a modélisé un très grand lac instable au-dessous de l'inlandsis laurentien, mais aujourd'hui ses idées à propos des lacs sous-glaciaires soulèvent le scepticisme.

L'analogie, l'outil préféré de G.K. Gilbert, père-fondateur de la géomorphologie des processus modernes, incite les spécialistes à faire de nombreuses études géomorphologiques. Ainsi le paysage des scablands est analogue à celui du labyrinthe ; et les marques d'érosion dans le substrat rocheux, sur la côte Soya, sont analogues au granit et au gneiss sculptés qu'on trouve en Ontario. Ces analogies portent sur les paysages d'érosion qu'on trouve sur les plates-formes antarctiques et donnent le point de départ à la recherche sur l'hydrologie des plateaux. La fonte graduelle permanente et l'écoulement de l'eau de fonte sur le plateau ne peuvent expliquer même les plus petites caractéristiques de l'érosion. Mais l'eau de fonte abondante explique toute la panoplie de formes de fond sur le plateau.

Le débat sur les drumlins et les mégalinéations se poursuit aujourd'hui, et il est tout aussi vif. Ces éléments constituent un grand pourcentage du paysage marin du plateau, et nos études testent le modèle de l'eau de fonte conçu pour la recherche sur leur origine. Nos conclusions dépendent dans une grande mesure de la prémissse fondamentale que des grandes

décharges d'eau de fonte ont envahi les sédiments mous sur le plateau et ainsi engendré de vastes formes de fond. Par analogie, les formes de fond du plateau pourraient bien avoir été formées lors des écoulements d'eau de fonte. Les vortex en fer à cheval expliquent l'origine des drumlins, et les vortex longitudinaux, celle des mégalinéations. Des travaux récents démontrent la puissance de ces vortex longitudinaux pour ce qui est de leur capacité d'éroder des lits mous, et ils expliquent le fait qu'on observe souvent des mégalinéations aux gradins orientés vers l'avant. Donc, le contexte hydrologique et les mécanismes détaillés des écoulements turbulents appuient la thèse selon laquelle les drumlins et les mégalinéations auraient été créés par l'eau de fonte. Les tenants de l'opinion que ces formes de fond résultent de la déformation font des déclarations semblables pour leurs processus préférés. La solution générale à ce problème pourrait bien provenir des études sur les creux en travers du plateau.

Un voyage dans des mondes différents nous fait passer de l'actuelle aridité de la vallée Wright aux énormes inondations qui se sont produites en dessous des inlandsis antarctiques. Les lacs qui se trouvent actuellement en dessous des inlandsis pourraient être des signes de futurs lacs instables plus grands, et les cataclysmes pourraient alors amener une reprise de l'excavation du labyrinthe et des scablands sillonnés de chenaux dans les zones où les plates-formes ont pris naissance et façonné de nouveaux drumlins et de nouvelles mégalinéations sur les plates-formes centrale et externe. Qui sait quels pourraient être les effets de telles inondations sur l'océan Austral et le climat de la Terre ?

## Références

- Anderson, J.B., et L.O. Fretwell, 2008. Geomorphology of the onset area of a paleo-ice stream, Marguerite Bay, Antarctic Peninsula. *Earth Surf. Process. Landf.*, 33(4), numéro spécial, 503–512.
- Bell, R.E., 2008. The role of subglacial water in ice-sheet mass balance. *Nature Geoscience*, 1(5), 297–304.
- Bradwell, T., M. Stoker et M. Krabbendam, 2008. Megagrooves and streamlined bedrock in NW Scotland: The role of ice streams in landscape evolution. *Geomorphology*, 97(1–2), 135–156.
- Bretz, J.H., 1969. The Lake Missoula floods and the Channeled Scabland. *J. Geol.*, 77(5), 505–543.

- Clark, C.D., 1993. Mega-scale glacial lineations and cross-cutting ice-flow landforms. *Earth Surf. Process. Landf.*, 18(1), 1-29.
- Flood, R.D., 1983. Classification of sedimentary furrows and a model for furrow initiation and evolution. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 94(5), 630-639.
- Gilbert, R., E.W. Domack et A. Camerlenghi, 2003. Deglacial history of the Greenpeace Trough: ice sheet to ice shelf transition in the northwestern Weddell Sea. Dans Domack, E., A. Leventer, A. Burnett, R. Bindschadler, P. Convey et M. Kirby, éd. *Antarctic Peninsula climate variability: historical and paleoenvironmental perspectives*. Washington, DC, American Geophysical Union, 195-204. (Antarctic Research Series 79.)
- Lee, Y.-D.E., et R.A. George, 2004. High resolution AUV survey results across a portion of the eastern Sigsbee Escarpment. *AAPG Bull.*, 88(6), 747-767.
- Lewis, A.R., D.R. Marchant, D.E. Kowalewski, S.L. Baldwin et L.E. Webb, 2006. The age and origin of the Labyrinth, western Dry Valleys, Antarctica: evidence for extensive middle Miocene subglacial floods and freshwater discharge to the Southern Ocean. *Geology [Boulder]*, 34(7), 513-516.
- Lowe, A.L., et J.B. Anderson, 2003. Evidence for abundant subglacial meltwater beneath the paleo-ice sheet in Pine Island Bay, Antarctica. *J. Glaciol.*, 49(164), 125-138.
- O'Cofaigh, C., C.J. Pudsey, J.A. Dowdeswell et P. Morris, 2002. Evolution of subglacial bedforms along a paleo-ice stream. *Antarctic Peninsula continental shelf. Geophys. Res. Lett.*, 29(8), 1199. (10.1029/2001GL014488.)
- Sawagaki, T., et K. Hirakawa, 1997. Erosion of bedrock by subglacial meltwater, Soya Coast, East Antarctica. *Geogr. Ann.*, 79A(4), 223-238.
- Schoof, C.G., et G.K.C. Clarke, 2008. A model for spiral flows in basal ice and the formation of subglacial flutes based on a Reiner-Rivlin rheology for glacial ice. *J. Geophys. Res.*, 113(B5), B05204. (10.1029/2007JB004957.)
- Shaw, J., A. Pugin et R.R. Young, 2008. A meltwater origin for Antarctic shelf bedforms with special attention to megalineations. *Geomorphology*, 102(3-4), 364-375.
- Shoemaker, E.M., 1991. On the formation of large subglacial lakes. *Journal canadien des sciences de la terre*, 28(12), 1975-1981.
- Smith, H.T.U., 1965. Anomalous erosional topography in Victoria Land, Antarctica. *Science*, 148(3672), 941-942.
- Williams, J.J., P.A. Carling, C.L. Amos et C. Thompson, 2008. Field investigation of ridge-runnel dynamics on an intertidal mudflat. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 79(2), 213-229.

John Shaw ([shawj@ualberta.ca](mailto:shawj@ualberta.ca)) est professeur au département des sciences de la terre et de l'atmosphère à l'Université de l'Alberta. Il a passé du temps dans la région des vallées sèches durant la saison australe 1975-1976.

## Sander Geophysics explore l'Antarctique

La société Sander Geophysics Limited (SGL) a eu la chance de pouvoir participer au projet de la province Gamburtsev, en Antarctique (AGAP). Ce projet est financé par le bureau des programmes polaires de la National Science Foundation des É.-U., dans le cadre de l'Année polaire internationale (API). En mai et juin 2007, des équipes de la SGL et du Lamont-Doherty Earth Observatory de l'Université Columbia ont installé le gravimètre inertiellement référencé de la SGL (AIRGRAV) dans un avion Kenn Borek DHC-6 Twin Otter, à Calgary. Une fois l'appareil installé, l'avion a effectué des vols d'essai au-dessus des Rocheuses. Il a ensuite survolé l'île d'Ellesmere, au Nunavut,

pour tester le système à de hautes latitudes, au-dessus du pôle Nord. Les tests ont été très fructueux pour ce qui est de la qualité des données AIRGRAV, des niveaux de bruit et du contrôle GPS. Cette réussite a incité l'équipe AGAP à choisir l'AIRGRAV au lieu des autres gravimètres pour effectuer le levé de l'Antarctique, un travail fort exigeant. Les tests au-dessus des Rocheuses ont été décrits par Studinger et d'autres spécialistes (2008). En mai et juin 2008, les équipes SGL et AGAP sont retournées à Calgary où elles ont installé le système AIRGRAV avec toute la panoplie d'instruments géophysiques AGAP dans le Twin Otter. L'appareil a effectué plusieurs vols d'essai fructueux au-dessus

de l'inlandsis du Groenland pour faire la vérification finale de la plate-forme à utiliser pour le levé, avant de se diriger vers le sud, pour atteindre l'Antarctique.

L'objectif primordial de l'AGAP : recueillir des données pour déterminer avec exactitude l'origine tectonique des monts sous-glaciaires Gamburtsev, à environ 3 km au-dessous de l'inlandsis qui date d'un million d'années, dans les profondeurs de l'Antarctique oriental (fig. 1). Le projet comprend aussi l'étude de la relation entre ces montagnes, l'inlandsis qui les recouvre et

les lacs sous-glaciaires, ainsi que le repérage de l'endroit où se trouve la plus vieille glace, pour qu'on puisse trouver le plus vieil indice du climat. Les opérations se dérouleront entre décembre 2008 et janvier 2009. L'équipe de la SGL, qui se joindra à l'équipe AGAP, en Antarctique, comprend le responsable du traitement des données chez SGL, Martin Bates, le géophysicien principal Stefan Elieff et le technicien Daniel Geue. Le système AIRGrav de la SGL recueillera des données sur la structure des montagnes enfouies au cours de l'exécution du levé gravimétrique et magnétique. Le Lamont-Doherty Earth Observatory de l'Université Columbia utilisera un altimètre laser qui scannera la surface des glaces pendant les vols pour fournir des renseignements sur l'élévation à la surface, un radar à synthèse d'ouverture (RSO) qui mesurera l'épaisseur et la stratification des glaces afin de cartographier la forme du substrat rocheux entouré, et des magnétomètres pour cartographier les champs magnétiques du substrat rocheux.

Le système AIRGrav de Sander Geophysics (fig. 2) offre un certain nombre d'avantages par rapport aux systèmes concurrents, notamment :

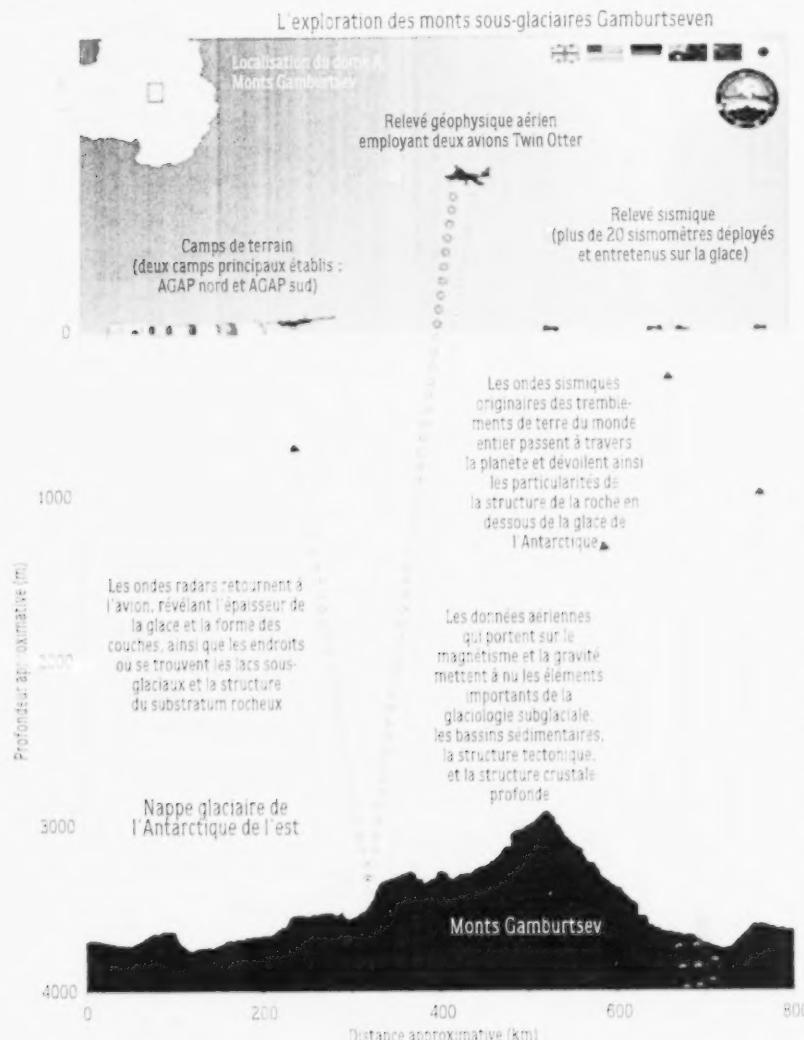


Figure 1 (à gauche)  
Diagramme montrant les diverses techniques géophysiques utilisées pour l'étude des monts Gamburtsev. Illustration gracieusement fournie par l'ACAP.

Figure 2 (à droite)  
Photo de l'AIRGrav installé sur le Twin Otter Kenn Borek DCH 6, prêt pour effectuer les levés. Gracieuseté de Michael Studinger, chercheur scientifique pour l'ACAP au centre Doherty.

1. Bien meilleure résolution et exactitude;
2. Possibilité de fonctionner dans des conditions normales de vol le jour;
3. Possibilité de fournir des données gravimétriques de haute qualité pendant les vols en mode adapté au drapage;
4. Possibilité de fournir des données aéromagnétiques de bonne qualité en même temps que les données AIRGrav;
5. Efficience des opérations considérable;
6. Requiert moins de temps pour l'acquisition et le traitement des données.

Ces avantages résultent tous du design et de la construction uniques du système AIRGrav. Celui-ci enregistre rigoureusement les données et compense les mouvements de l'aéronef dus à la turbulence, ses vibrations et le drapage, en permettant la suppression de ces effets dans les données finales, au cours du traitement. Un GPS de très haute qualité combiné au GPS propre à la SGI et à un logiciel de traitement des données gravimétriques complètent le système AIRGrav. Les intéressés peuvent consulter le site Web de la SGI ([www.sgi.com](http://www.sgi.com)) ainsi que nos textes techniques pour obtenir des détails sur le système.

#### Références

- Studinger, M., R. Bell et N. Frearson, 2008. Comparison of AIRGrav and GT-1A airborne gravimeters for research applications. *Geophysics*, 73(6), 151-161.  
Les intéressés peuvent trouver des renseignements supplémentaires sur ce projet en consultant le site Web du Lamont-Doherty Earth Observatory pour l'AGAP ([www.ledo.columbia.edu/res/pi/gambit](http://www.ledo.columbia.edu/res/pi/gambit)).



## Nouvelles en bref

**Wilhelmina Roa Clavano** a obtenu l'une des trois bourses de recherche du CSRA. Une première au Canada. Wendy, une experte en télédétection qui travaille à l'Université de l'Alberta avec Martin Sharp, boursier postdoctoral, analyse l'information provenant des données de gémétradar (GR) sur les glaciers de l'Arctique. L'intérêt pour l'Antarctique a été encouragé par la collaboration avec Christian Haas, qui avait été invité par Wolfgang Rack, de Gateway Antarctica, en Nouvelle-Zélande, à visiter la base Scott Base et à utiliser un appareil de mesure d'inductance héliporté (HEM) au-dessus de la glace terrestre et de la glace marine. Comme le HEM ne fournit pas de données sur les couches de neige ou de glace à la surface, Wendy examinera des transects coïncidants à l'aide d'un instrument GR durant l'hiver austral 2009. L'aide du CSRA lui permettra de coordonner cette collecte de données par GR et le traitement des données à l'Université de Canterbury, où elle sera accueillie par Wolfgang Rack qui soutient tout le travail de logistique sur le terrain. Les mesures GR et les autres mesures prises au sol apporteront directement les données nécessaires à l'étalonnage et à la validation de l'instrument utilisé à bord du CryoSat, un satellite que lancera l'Agence spatiale européenne pour la recherche sur la cryosphère, et elles seront aussi utiles pour le TESat de la NASA. ■

Le 11 février 2009, **Affaires indiennes et du Nord Canada** a officiellement annoncé que le ministère avait signé un protocole d'entente qui établit les modalités d'autorisation par le Royaume-Uni et le Canada des installations et de l'infrastructure en milieu polaire. Cette démarche amènera de nouvelles possibilités de faire des études conjointes sur le terrain et facilitera l'accès commun au

de l'inlandsis du Groenland pour faire la vérification finale de la plate-forme à utiliser pour le levé, avant de se diriger vers le sud, pour atteindre l'Antarctique.

L'objectif primordial de l'AGAP : recueillir des données pour déterminer avec exactitude l'origine tectonique des monts sous-glaciaires Gamburtsev, à environ 3 km au-dessous de l'inlandsis qui date d'un million d'années, dans les profondeurs de l'Antarctique oriental (fig. 1). Le projet comprend aussi l'étude de la relation entre ces montagnes, l'inlandsis qui les recouvre et

les lacs sous-glaciaires, ainsi que le repérage de l'endroit où se trouve la plus vieille glace, pour qu'on puisse trouver le plus vieil indice du climat. Les opérations se dérouleront entre décembre 2008 et janvier 2009. L'équipe de la SGL, qui se joindra à l'équipe AGAP, en Antarctique, comprend le responsable du traitement des données chez SGL, Martin Bates, le géophysicien principal Stefan Elieff et le technicien Daniel Geue. Le système AIRGrav de la SGL recueillera des données sur la structure des montagnes enfouies au cours de l'exécution du levé gravimétrique et magnétique. Le Lamont-Doherty Earth Observatory de l'Université Columbia utilisera un altimètre laser qui scanera la surface des glaces pendant les vols pour fournir des renseignements sur l'élévation à la surface, un radar à synthèse d'ouverture (RSO) qui mesurera l'épaisseur et la stratification des glaces afin de cartographier la forme du substrat rocheux enfoui, et des magnétomètres pour cartographier les champs magnétiques du substrat rocheux.

Le système AIRGrav de Sander Geophysics (fig. 2) offre un certain nombre d'avantages par rapport aux systèmes concurrents, notamment :

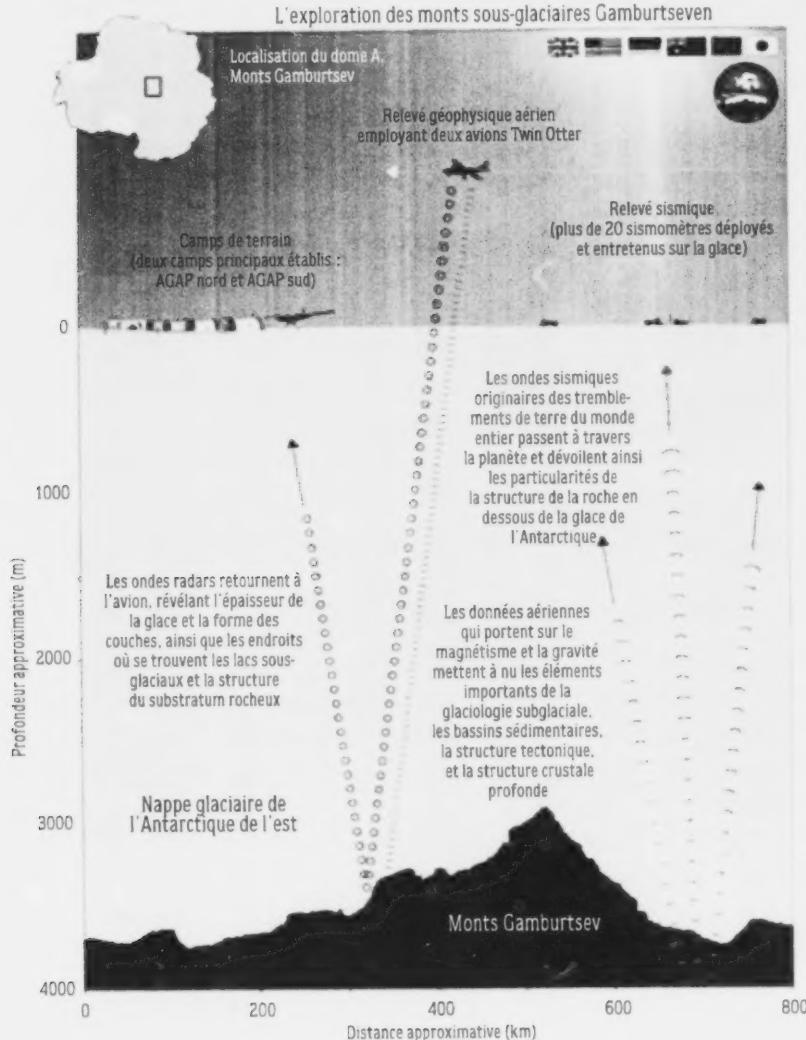


Figure 1 (à gauche)  
Diagramme montrant les diverses techniques géophysiques utilisées pour l'étude des monts Gamburtsev. Illustration gracieusement fournie par l'AGAP.

Figure 2 (à droite)  
Photo de l'AIRGrav installé sur le Twin Otter Kenn Borek DCH-6, prêt pour effectuer les levés. Gracieuseté de Michael Studinger, chercheur scientifique pour l'AGAP au centre Doherty.

1. Bien meilleure résolution et exactitude;
2. Possibilité de fonctionner dans des conditions normales de vol le jour;
3. Possibilité de fournir des données gravimétriques de haute qualité pendant les vols en mode adapté au drapage;
4. Possibilité de fournir des données aéromagnétiques de bonne qualité en même temps que les données AIRGrav;
5. Efficience des opérations considérable;
6. Requiert moins de temps pour l'acquisition et le traitement des données.

Ces avantages résultent tous du design et de la construction uniques du système AIRGrav. Celui-ci enregistre rigoureusement les données et compense les mouvements de l'aéronef dus à la turbulence, ses vibrations et le drapage, en permettant la suppression de ces effets dans les données finales, au cours du traitement. Un GPS de très haute qualité combiné au GPS propre à la SGL et à un logiciel de traitement des données gravimétriques complètent le système AIRGrav. Les intéressés peuvent consulter le site Web de la SGL ([www.sgl.com](http://www.sgl.com)) ainsi que nos textes techniques pour obtenir des détails sur le système.

#### Références

- Studinger, M., R. Bell et N. Frearson, 2008. Comparison of AIRGrav and GT-1A airborne gravimeters for research applications. *Geophysics*, 73(6), 151–161.  
Les intéressés peuvent trouver des renseignements supplémentaires sur ce projet en consultant le site Web du Lamont-Doherty Earth Observatory pour l'AGAP ([www.ledo.columbia.edu/res/pi/gambit](http://www.ledo.columbia.edu/res/pi/gambit)).



## Nouvelles en bref

**Wilhelmina Roa Clavano** a obtenu l'une des trois bourses de recherche du CSRA. Une première au Canada. Wendy, une experte en télédétection qui travaille à l'Université de l'Alberta avec Martin Sharp, boursier postdoctoral, analyse l'information provenant des données de géoradar (GR) sur les glaciers de l'Arctique. L'intérêt pour l'Antarctique a été encouragé par la collaboration avec Christian Haas, qui avait été invité par Wolfgang Rack, de Gateway Antarctica, en Nouvelle-Zélande, à visiter la base Scott Base et à utiliser un appareil de mesure d'inductance héliporté (HEM) au-dessus de la glace terrestre et de la glace marine. Comme le HEM ne fournit pas de données sur les couches de neige ou de glace à la surface, Wendy examinera des transects coïncidents à l'aide d'un instrument GR durant l'été austral 2009. L'aide du CSRA lui permettra de coordonner cette collecte de données par GR et le traitement des données à l'Université de Canterbury, où elle sera accueillie par Wolfgang Rack qui soutient tout le travail de logistique sur le terrain. Les mesures GR et les autres mesures prises au sol apporteront directement les données nécessaires à l'étalonnage et à la validation de l'instrument utilisé à bord du CryoSat, un satellite que lancera l'Agence spatiale européenne pour la recherche sur la cryosphère, et elles seront aussi utiles pour le ICESAT de la NASA. ■

Le 11 février 2009, **Affaires indiennes et du Nord Canada** a officiellement annoncé que le ministère avait signé un protocole d'entente qui établit les modalités d'utilisation par le Royaume-Uni et le Canada des installations et de l'infrastructure en milieu polaire. Cette démarche amènera de nouvelles possibilités de faire des études conjointes sur le terrain et facilitera l'accès commun au

savoir-faire scientifique, la formation ainsi que la sensibilisation du public. Le Canada devrait faire appel à l'expertise du R.-U. pour la conception de la station de recherche dans l'Extrême-Arctique que le gouvernement fédéral a promis d'aider à construire.

La nouvelle entente devrait simplifier le partage des

ressources, comme les avions de brousse, et inclure un mécanisme de financement de la recherche. On s'attend à l'adoption d'un système de contrepartie pour l'hébergement, la logistique et les voyages des scientifiques du R.-U. qui travailleront dans l'Arctique canadien et des scientifiques canadiens qui travailleront en Antarctique. ■

## Membres et conseillers du CCAR/CCRA

Marianne Douglas,  
directrice (présidente)  
Institut circumpolaire canadien,  
Université de l'Alberta  
8625-112 Street  
Edmonton (Alberta) T6G 0H1  
Tél. : 780 492-0055  
Téléc. : 780 492-1153  
msdougl@ua:berta.ca

Kathy Conlan  
Musée canadien de la nature  
C.P. 3443, succursale D  
Ottawa (Ontario) K1P 6P4  
Tél. : 613 364-4063  
Téléc. : 613 364-4027  
kconlan@mus-nature.ca

Thomas S. James  
Commission géologique du Canada  
Ressources naturelles Canada  
9860 West Saanich Road,  
P.O. Box 6000  
Sidney (C.B.) V8L 4B2  
Tél. : 250 363-6403  
Téléc. : 250 363-6565  
tjames@nrcan.gc.ca

Émilien Pelletier  
Institut des sciences de la mer de  
Rimouski (ISMER)  
310, allée des Ursulines, C.P. 3300

Rimouski (Québec) G5L 3A1  
Tél. : 418 723 1986 x 1764  
Téléc. : 418 724-1842  
emilien\_pelletier@uqar.qc.ca

Peter L. Pulsifer  
Centre de géomatique et de  
recherche cartographique  
Université Carleton  
1125, prom. Colonel By  
Ottawa (Ontario) K1S 5B6  
Tél. : 613 761-7995  
Téléc. : 613 520-2395  
pulsifer@magma.ca

Martin Sharp  
Sciences de la terre et de  
l'atmosphère  
Université de l'Alberta  
1-26 Earth Sciences Building  
Edmonton (Alberta) T6G 2E3  
Tél. : 780 492-4156  
Téléc. : 780 492-2030  
martin.sharp@ualberta.ca

Dave Williams  
McMaster Centre for Medical Robot-  
ics  
St. Joseph's Healthcare  
50, av. Charlton est  
Hamilton (Ontario) L8N 4A6  
Tél. : 905 521-6197  
willd@mcmaster.ca

Fred Roots  
(conseiller sur l'Antarctique CCAP)  
Environnement Canada  
351, boul. St-Joseph, 1<sup>er</sup> étage  
Gatineau (Québec) K1A 0H3  
Tél. : 819 997-2393  
Téléc. : 819 997-5813  
fred.roots@ec.gc.ca

Wayne Pollard  
(président sortant)  
Département de géographie  
Université McGill  
805, rue Sherbrooke ouest  
Montréal (Québec) H3A 2K6  
Tél. : 514 398-4454  
Téléc. : 514 398-7437  
pollard@felix.geog.mcgill.ca

Bulletin du Réseau canadien de recherches  
antarctiques

Tous droits réservés  
© Commission canadienne des affaires  
polaires/Réseau canadien de recherches  
antarctiques

Simon Ommannay (secrétaire du CCRA)  
56 Spinney Road, P.O. Box 730, R.R. #1  
Glenwood, Yarmouth County (N. É) B0W 1W0  
Tél. : 902 643-2527  
simon.ommanay@ns.sympatico.ca

Rédacteur : C. Simon L. Ommannay  
Veuillez envoyer vos contributions et lettres à :  
C. Simon L. Ommannay  
Rédacteur, Bulletin du RCRA  
Adresse ci-dessus.

Commission canadienne des affaires polaires  
Suite 1710, 360, rue Albert  
Ottawa (Ontario) K1R 7X7  
Tél. : 613 943-8605  
Téléc. : 613 943-8607  
mail@polar.com.gc.ca  
www.polarcom.gc.ca

